应用康奈尔净碳水化合物—蛋白质体系和NRC模型比较料常用粗饲料和玉米纤维饲料的营养价值[1]

郝小燕 高 红 张幸怡 王晓帆 丁 雪 张永根*

（东北农业大学动物科技学院，哈尔滨 150030）

摘 要：本试验旨在应用康奈尔净碳水化合物—蛋白质体系（CNCPS）和NRC模型比较玉米纤维饲料（DCGF）与奶牛常用粗饲料（苜蓿、玉米青贮、羊草）营养价值，进而分析DCGF作为奶牛纤维饲料资源的可行性。采集东北地区不同牧场的饲料样本，测定营养成分后利用CNCPS模型对各饲料蛋白质和碳水化合物进行剖分，并预测各饲料对奶牛的潜在营养物质供给量，同时利用NRC模型对4种饲料的可消化养分和能值进行估测计算。结果表明：1）DCGF 中粗蛋白质（CP）含量显著高于玉米青贮和羊草（P<0.05），中性洗涤纤维（NDF）含量显著高于苜蓿（P<0.05），且酸性洗涤纤维（ADF）、酸性洗涤木质素（ADL）含量显著低于其他3种粗饲料（P<0.05）。2）DCGF快速降解真蛋白质（PB1）和中速降解真蛋白质（PB2）含量显著低于苜蓿（P<0.05）；中速降解碳水化合物（CB1）和慢速降解碳水化合物（CB2）含量显著高于其他3种粗饲料（P<0.05）。3）苜蓿的可代谢蛋白质（MP）含量最高，其次为DCGF。4）DCGF在维持水平下总可消化养分（TDNm）和净能均最高。结果提示，DCGF具有较高的营养价值，可以作为奶牛纤维类高蛋白质料替代奶牛饲粮中部分粗饲料，缓解我国优质粗饲料、蛋白质饲料资源紧缺的压力。

关键词：玉米纤维饲料；粗饲料；营养价值；能值

中图分类号：S816.5

玉米是世界上最重要的粮食资源，且我国是玉米淀粉生产大国，玉米湿磨法生产淀粉时伴随有 30%的副产物产生，这些副产物主要包括玉米浆、玉米皮、玉米麸及少量玉米胚芽饼粕等。玉米纤维饲料（dry corn gluten feed,DCGF）是由玉米皮和玉米浸泡水浓缩形成的玉米浆以大约2∶1的比例混合而成的一种富含可消化纤维和可消化蛋白质的纤维性饲料。DCGF 的淀粉含量大约为玉米淀粉含量的 1/6 甚至更少，反刍动物饲粮中添加一定比例的DCGF有利于稳定瘤胃内环境，有效减少瘤胃酸中毒的发生[1]。DCGF中除淀粉之外，各营

收稿日期：2015-10-04

基金项目：寒区规模化奶牛场奶牛精细饲养与粗饲料高效利用关键技术集成与示范（2012BAD12B05-1）

作者简介：郝小燕（1990—），女，内蒙古乌兰察布人，博士，从事反刍动物营养与生产研究。E-mail: haoxiaoyan1990@sina.com

*通信作者：张永根，教授，博士生导师，E-mail: zhangyonggen@sina.com

养成分含量几乎是其原料中的 3 倍[2]。随着我国奶牛养殖业的发展，优质粗饲料资源短缺日渐严重，开发新型纤维饲料资源对奶牛养殖业意义重大。为科学、全面地评价 DCGF 的营养价值，评估其是否可以作为奶牛的优质纤维饲料资源开发利用，本试验应用康奈尔净碳水化合物—蛋白质体系（Cornell net carbohydrate and protein system,CNCPS）和 NRC 模型比较研究了 DCGF 与奶牛常用粗饲料苜蓿、玉米青贮、羊草的营养价值，旨在为 DCGF 在奶牛生产中科学、合理应用提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验材料包括 DCGF、苜蓿、玉米青贮和羊草，采集自东北地区的 4 个牧场和嘉吉生化有限公司，共 11 个饲料样本代表 4 种试验原料，其中 DCGF 的 2 个样本分别取自齐齐哈尔飞鹤原生态牧场和嘉吉生化有限公司，苜蓿、玉米青贮和羊草各 3 个样本分别取自山东屯荷斯坦奶牛繁育场、黑龙江九三荣军澳牛繁育中心和雀巢 DFI 牧场。所有样本采用四分法采集，玉米青贮于 65 ℃烘干 48 h 后，粉碎过 1 mm 筛，放入自封袋中于 4 ℃保存待测[3]。

1.2　试验方法

1.2.1　营养成分分析

4 种饲料原料的干物质（dry matter,DM,AOAC 930.15）、粗灰分（ash,AOAC 942. 05）、粗脂肪（ether extract,EE,AOAC 984. 13）、粗蛋白质（crude protein,CP,AOAC 984. 13）等常规营养成分含量分析参照 AOAC[4]标准进行。淀粉含量参照张旭等[5]方法测定，α-淀粉酶、葡萄糖淀粉酶、葡萄糖试剂盒均购自上海荣盛生物制药有限公司。中性洗涤纤维（neutral detergent fiber,NDF）、酸性洗涤纤维（acid detergent fiber,ADF）、酸性洗涤木质素（acid detergent lignin,ADL）、中性洗涤不溶粗蛋白质（neutral detergent insoluble crude protein,NDICP）和酸性洗涤不溶粗蛋白质（acid detergent insoluble crude protein,ADICP）的含量参照 Van Soest 等[6]的方法测定。可溶性粗蛋白质（soluble crude protein,SCP）、非蛋白氮（NPN）含量根据 CNCPS 的测定方法进行[7]。碳水化合物（CHO）、非结构性碳水化合物（non-structure carbohydrate,NSC）、纤维素和半纤维素含量通过相应的公式计算得出。每种饲料样本每个指标测定 3 个重复。

1.2.2　CNCPS 对饲料蛋白质组分的剖分

CNCPS 体系评价饲料营养价值时充分考虑植物细胞成分及饲料在反刍动物体内的消化特点，使得分析结果更具有参考价值。在 CNCPS 蛋白质剖分体系中，饲料 CP 被剖分为非蛋白氮（PA）、真蛋白质（PB）和不可利用蛋白质（PC）3 个部分；结合饲料瘤胃降解特性，PB 可进一步剖分为快速降解真蛋白质（PB1）、中速降解真蛋白质（PB2）和慢速降解真蛋白质（PB3）3 个亚组分，计算公式如下[8]：

$$\text{PA（\% CP）}=\text{NPN（\% SCP）}\times\text{SCP（\% CP）}\times 0.01；$$

$$\text{PB1（\% CP）}=\text{SCP（\% CP）}-\text{PA（\% CP）}；$$

$$\text{PC（\% CP）}=\text{ADICP（\% CP）}；$$

$$\text{PB3（\% CP）}=\text{NDICP（\% CP）}-\text{ADICP（\% CP）}；$$

$$\text{PB2（\% CP）}=1-\text{PA（\% CP）}-\text{PB1（\% CP）}-\text{PB3（\% CP）}-\text{PC（\% CP）}。$$

1.2.3 CNCPS 对 CHO 组分的剖分

CNCPS 体系从饲料 CHO 的降解速率角度将其剖分为 4 个部分，分别为快速降解碳水化合物（CA，主要为糖类）、中速降解碳水化合物（CB1，主要由淀粉和果胶组成）、慢速降解碳水化合物（CB2，主要为可消化纤维部分）和不可利用碳水化合物（CC，主要为植物细胞壁部分），计算公式如下[9]：

$$\text{CHO}(\%\ \text{DM})=1-\text{CP}(\%\ \text{DM})-\text{EE}(\%\ \text{DM})-\text{ash}(\%\ \text{DM})；$$

$$\text{CC}(\%\ \text{CHO})=100\times[\text{NDF}(\%\ \text{DM})\times 0.01\times\text{ADL}(\%\ \text{NDF})\times 2.4]/\text{CHO}(\%\ \text{DM})；$$

$$\text{CB2}(\%\ \text{CHO})=100\times[\text{NDF}(\%\ \text{DM})-\text{NDICP}(\%\ \text{CP})\times 0.01\times\text{CP}(\%\ \text{DM})-\text{NDF}(\%\ \text{DM})\times 0.01\times\text{ADL}(\%\ \text{NDF})\times 2.4/\text{CHO}(\%\ \text{DM})]；$$

$$\text{NSC}(\%\ \text{CHO})=1-\text{CB2}(\%\ \text{CHO})-\text{CC}(\%\ \text{CHO})；$$

$$\text{CB1}(\%\ \text{CHO})=[1-\text{淀粉}(\%\ \text{NSC})]\times[1-\text{CB2}(\%\ \text{CHO})-\text{CC}(\%\ \text{CHO})]。$$

1.2.4 CNCPS 模型估测潜在营养价值供给量

使用 CNCPS 模型来估测 4 种试验原料的潜在营养价值供给量，包括瘤胃可降解蛋白质（rumen degraded protein,RDP）、瘤胃非降解蛋白质（rumen-undegraded protein,RUP）、菌体蛋白质（microbial protein,MCP）、小肠可吸收菌体蛋白质（absorbable microbial protein,AMCP）、小肠可吸收瘤胃非降解蛋白质（absorbable rumen-undegraded protein,ARUP）、小肠可吸收内源真蛋白质（absorbable endogenous true protein,AECP）、可代谢蛋白质（metabolizable

protein,MP）。分别以 4 种试验原料为单一饲料饲粮，根据 CNCPS 模型，瘤胃能氮供给量平衡（rumen energy nitrogen balance,RENB）由瘤胃可降解蛋白质提供的菌体蛋白质（MCP_{RDP}）和维持水平总可消化养分（total digestible nutrients at maintenance level,TDNm）可提供的菌体蛋白质（MCP_{TDNm}）的差值来估测，计算公式如下[10-11]：

$$RDP=A+B\times[K_d/(K_d+K_p)];$$

$$RUP=A+B\times[K_p/(K_d+K_p)]+C。$$

式中：A 为快速降解粗蛋白质部分，B 为可降解粗蛋白质部分，C 为完全不降解的粗蛋白质部分；K_d 为 B 的降解速率；K_p 为待测饲料瘤胃流通速率。

$$MCP(g/kg\ DM)=0.13\times TDNm\times eNDFadj。$$

式中：当物理有效中性洗涤纤维(peNDF)/NDF>20%时，$eNDFadj$=1.0；当peNDF/NDF<20%时，$eNDFadj$=1.0-[(20–peNDF)×0.025]。

$$AMCP(g/kg\ DM)=0.80\times 0.80\times MCP。$$

式中：MCP 中 80%为 PB，80%可在小肠内吸收[NRC（2001）[12]]。

$$ARUP=RUP\times 0.85;$$

$$ECP(g/kg\ DM)=6.25\times 1.9\times DM;$$

$$AECP(g/kg\ DM)=0.50\times 0.80\times ECP。$$

式中：ECP 为内源 PB，50%的 ECP 能到达十二指肠，且 80%为 PB[NRC（2001）[12]]。

$$MP(g/kg\ DM)=ARUP+AMCP+AECP;$$

$$RENB=MCP_{TDNm}-MCP_{RDP}。$$

式中：$MCP_{TDNm}=0.13\times TDNm$，$MCP_{RDP}=0.9\times RDP$。

1.2.5 NRC 模型估测真可消化养分与能值

使用 NRC（2001）[12]估测模型估测 4 种试验原料奶牛瘤胃真可消化非纤维性碳水化合物（truly digestible non-fiber carbohydrate,tdNFC）、真可消化粗蛋白质（truly digestible crude protein,tdCP）、真可消化中性洗涤纤维（truly digestible neutral detergent fiber,tdNDF）和真可消化脂肪酸（truly digestible fatty acids,tdFA）。进而估测出各饲料的 TDNm、生产水平（即采食量为维持水平的 3 倍时）消化能（digestible energy at production level,DE_P)、生产水平代谢能（metabolizable energy at production level,ME_P）及生产水平泌乳净能（net energy for

lactation at production level,NE_{LP}）。同时，采用肉牛估测模型公式预测各饲料的维持净能（net energy for maintenance,NE_m）和增重净能（net energy for gain,NE_g），各预测公式如下[12-13]：

$$tdNFC=0.98\times\{1-[(NDF-NDICP)+CP+EE+ash]\}\times PAF;$$

$$tdCP=CP\times\exp[-1.2\times(ADICP/CP)];$$

$$tdFA=FA=(EE-1);$$

$$tdNDF=0.75\times(NDF-NDICP-ADL)\times\{1-[ADL/(NDF-NDICP)]\}^{0.667}。$$

式中：PAF 为加工校正因子（processing adjustment factor）；如果 EE<1，则 FA=0。

$$TDN_m(\%)=tdNFC+tdCP+(tdFA\times2.25)+tdNDF-7;$$

$$DE_{1X}(MJ/kg)=(tdNFC\times4.2+tdNDF\times4.2+tdCP\times5.6+tdFA\times9.4-0.3)\times4.18;$$

$$折扣系数=4.18\times\{[TDNm-(0.18\times TDNm-10.3)]\times2\}/TDNm;$$

$$DE_P(MJ/kg)=4.18\times DE_{1X}\times 折扣系数;$$

$$ME_P(MJ/kg)=4.18\times(1.01\times DE_P-0.45);$$

$$NE_{LP}(MJ/kg)=4.18\times[(0.703\times ME_P)-0.19];$$

$$NE_m(MJ/kg)=4.18\times[1.37\times(DE_{1X}\times0.82)-0.138\times(DE_{1X}\times0.82)^2+0.0\ 105\times(DE_{1X}\times0.82)^3-1.12];$$

$$NE_g(MJ/kg)=4.18\times[1.42\times(DE_{1X}\times0.82)-0.174\times(DE_{1X}\times0.82)^2+0.0122\times(DE_{1X}\times0.82)^3-1.65]。$$

式中：如果 TDNm<60%，消化率的折扣忽略不计。

1.3 数据统计分析

所有数据采用 Excel 整理，并采用 SAS 9.3 中的 Mixed 模型进行统计分析。具体模型为:

$$Y_{ij}=\mu+F_i+e_{ij}。$$

式中：Y_{ij} 是由变量 i、j 所得的因变量，μ 是变量平均值，F_i 表示饲料来源的固定因素，e_{ij} 表示随机误差。

2 结果与分析

2.1 DCGF 和 3 种粗饲料的营养成分

从表 1 可见，DCGF 与奶牛常用粗饲料的营养成分含量有较大差异。DCGF 的 DM 含量与苜蓿、羊草相近（P>0.05），有机物含量显著高于苜蓿（P<0.05）。羊草的 NDF、ADF 含量最高，苜蓿的 NDF 含量最低，而 DCGF 的 ADF、ADL 含量显著低于其他 3 种粗饲料（P<0.05）。DCGF 的纤维素含量最低，但半纤维素含量（371.7 g/kg DM）最高。DCGF 的

淀粉含量与玉米青贮相当（P>0.05），显著高于苜蓿和羊草的淀粉（P<0.05）。苜蓿的 CP 含量（213.4 g/kg DM）最高，DCGF（205.4 g/kg DM）次之，并且显著高于青贮玉米和羊草（P<0.05）。4 种粗饲料的 SCP、NPN 含量有很大差异，DCGF 的 NPN 含量（SCP 中）显著高于其他 3 种粗饲料。DCGF 的 ADICP 含量（15.2 g/kg CP）显著低于其他饲料（P<0.05），羊草的 NDICP 含量（386.2 g/kg CP）最高。

表 1　DCGF 和 3 种粗饲料的营养成分

Table 1　Nutrient composition of DCGF and other three kinds of roughages

项目 Items	玉米纤维饲料 DCGF	苜蓿 Alfalfa hay	玉米青贮 Corn silage	羊草 Wildrye	SEM
干物质 DM/(g/kg)	942.7^{a}	925.3^{a}	276.0^{b}	942.8^{a}	5.8
粗灰分 Ash/(g/kg DM)	60.5^{b}	115.3^{a}	52.6^{c}	60.5^{b}	1.2
有机物 OM/(g/kg DM)	939.5^{b}	884.7^{c}	947.4^{a}	936.8^{b}	1.2
粗脂肪 EE/(g/kg DM)	28.0^{a}	13.1^{b}	26.1^{a}	11.9^{b}	0.8
中性洗涤纤维 NDF/(g/kg DM)	517.6^{c}	417.7^{d}	656.9^{b}	685.6^{a}	2.9
酸性洗涤纤维 ADF/(g/kg DM)	145.9^{d}	308.5^{c}	360.3^{b}	404.1^{a}	1.9
酸性洗涤木质素 ADL/(g/kg DM)	23.9^{d}	96.9^{c}	114.7^{b}	143.6^{a}	2.0
纤维素 Cellulose/(g/kg DM)	122.1^{d}	211.6^{c}	245.5^{b}	260.5^{a}	3.0
半纤维素 Hemicellulose/(g/kg DM)	371.7^{a}	109.2^{d}	296.6^{b}	281.5^{c}	4.1
淀粉 Starch/(g/kg DM)	106.3^{a}	17.3^{b}	113.8^{a}	11.8^{b}	2.4
碳水化合物 CHO/(g/kg DM)	706.4^{c}	659.3^{d}	862.6^{a}	852.7^{b}	1.6
粗蛋白质 CP/(g/kg DM)	205.4^{b}	213.4^{a}	58.3^{d}	75.0^{c}	1.0
可溶性粗蛋白质 SCP/(g/kg CP)	643.8^{a}	423.5^{c}	551.8^{b}	284.2^{d}	3.2
非蛋白氮 NPN/(g/kg SCP)	930.7^{a}	618.9^{c}	896.2^{a}	812.1^{b}	13.7
酸性洗涤不溶粗蛋白质 ADICP/(g/kg CP)	15.2^{d}	37.5^{c}	135.1^{a}	55.9^{b}	3.1
中性洗涤不溶粗蛋白质 NDICP/(g/kg CP)	154.5^{c}	118.7^{d}	168.3^{b}	386.2^{a}	4.2
非结构性碳水化合物 NSC/(g/kg CHO)	312.2^{b}	400.7^{a}	249.8^{c}	225.1^{d}	1.9

同行数据不同字母肩标表示差异显著(P＜0.05)，相同或无字母肩标表示差异不显著(P＞0．05）。下表

同。

In the same row，values with different letter superscripts mean significant difference (P<0.05)， while with the same or no letter superscripts mean no significant difference (P>0.05). The same as below.

2.2 CNCPS 对 DCGF 和 3 种粗饲料蛋白质和 CHO 组分的剖分

从表 2 可见，DCGF 和其他 3 种粗饲料蛋白质和 CHO 组分存在显著差异（P<0.05）。用 CNCPS 对 4 种饲料原料的蛋白质组分剖分后，DCGF 具有较高的 PA 含量（599.2 g/kg CP），而 PB 含量（388.6 g/kg CP）最低。苜蓿的 PB1 和 PB2 显著高于其他 3 种饲料（P<0.05），羊草的 PB3 含量最高，玉米青贮 PB3 含量最低。DCGF 的 PC 含量（15.2 g/kg DM）最低，而玉米青贮 PC 含量（135.1 g/kg DM）最高。从 CNCPS 对 CHO 组分剖分结果可以看出，DCGF 的 CA 含量最低，而 CB1 和 CB2 组分含量显著高于其他 3 种粗饲料（P<0.05）。羊草的 CC 含量（412.1 g/kg CHO）最高，苜蓿（348.6 g/kg CHO）次之，而 DCGF 的 CC 含量（81.4 g/kg CHO）最低。

表 2 CNCPS 对 DCGF 和 3 种粗饲料蛋白质和 CHO 组分的剖分

Table 2 Partition of subfractions of protein and carbohydrate of DCGF and other three kinds of roughages using CNCPS

项目 Items	玉米纤维饲料 DCGF	苜蓿 Alfalfa hay	玉米青贮 Corn silage	羊草 Wildrye	SEM
蛋白质组分 Protein composition/(g/kg CP)					
非蛋白氮 PA	599.2^{a}	262.1^{c}	494.5^{b}	233.4^{d}	5.6
快速降解真蛋白质 PB1	44.6^{b}	161.4^{a}	57.3^{b}	54.2^{b}	5.4
中速降解真蛋白质 PB2	204.8^{d}	457.8^{a}	279.9^{c}	332.9^{b}	7.7
慢速降解真蛋白质 PB3	139.3^{b}	81.2^{c}	33.2^{d}	323.6^{a}	7.0
不可降解蛋白质 PC	15.2^{d}	37.5^{c}	135.1^{a}	55.9^{b}	3.4
真蛋白质 PB	388.6^{b}	700.4^{a}	370.4^{b}	710.6^{a}	5.7
碳水化合物组分 CHO composition/(g/kg CHO)					
快速降解碳水化合物 CA	71.7^{d}	233.0^{a}	153.9^{c}	217.8^{b}	4.5
中速降解碳水化合物 CB1	239.5^{a}	71.8^{c}	99.3^{b}	10.6^{d}	0.6

缓慢降解碳水化合物 CB2	607.4[a]	346.6[c]	437.6[b]	359.5[c]	6.2
不可利用碳水化合物 CC	81.4[d]	348.6[b]	309.2[c]	412.1[a]	3.7

2.3 DCGF 和 3 种粗饲料对奶牛潜在营养供应量的预测

利用 CNCPS 模型对 DCGF 和 3 种奶牛常用粗饲料对奶牛的潜在营养供应量预测结果见表 3。DCGF 的 RDP 含量为 159.6 g/kg DM，显著高于其他 3 种粗饲料（P<0.05），而 RUP 含量(41.6 g/kg DM)低于苜蓿，高于玉米青贮和羊草（P<0.05）。DCGF 的 MCP 含量预测值为 89.4 g/kg DM，显著高于其他 3 种粗饲料（P<0.05）。DCGF 的 AMCP 产量最高，苜蓿的 ARUP 含量最高，玉米青贮的 ECP 含量显著低于 DCGF、苜蓿和羊草（P<0.05），而其他 3 种饲料差异不显著（P>0.05）。苜蓿的 MP 含量（106.7 g/kg DM）最高，DCGF（96.8 g/kg DM）次之，二者显著高于玉米青贮和羊草（P<0.05）。按供给的能量和 MCP 含量结果表明，DCGF 的 MCP_{RDP} 和 MCP_{TDNm} 含量最高，苜蓿次之，并均显著高于玉米青贮和羊草（P<0.05）；DCGF 和苜蓿的瘤胃能氮供给平衡分别为-54.5 和-61.5 g/kg DM，即 RDP 供给过剩，而能量供给量不足。

表 3 DCGF 和 3 种粗饲料对奶牛潜在营养供应量的预测

Table 3 Prediction of the potential nutrient supply to dairy cattle from DCGF and other three kinds of roughages

项目 Items	玉米纤维饲料 DCGF	苜蓿 Alfalfa hay	玉米青贮 Corn silage	羊草 Wildrye	SEM
粗蛋白质的瘤胃降解特征 CP ruminal degradation characteristics					
瘤胃可降解蛋白质 RDP/（% CP）	77.4[a]	67.2[c]	72.4[b]	59.7[d]	0.9
瘤胃可降解蛋白质 RDP/(g/kg DM)	159.6[a]	146.3[b]	41.2[c]	44.2[c]	0.9
瘤胃非降解蛋白质 RUP/(% CP)	22.5[d]	32.8[b]	27.6[c]	40.3[a]	1.1
瘤胃非降解蛋白质 RUP/(g/kg DM)	41.6[b]	67.7[a]	16.5[d]	30.7[c]	0.77
估测可代谢蛋白质 Predicted MP					
菌体蛋白质 MCP/(g/kg DM)	89.4[a]	69.8[b]	64.1[c]	55.7[d]	0.5
可吸收菌体蛋白质 AMCP/(g/kg DM)	56.8[a]	43.0[b]	41.8[b]	36.0[c]	0.7
可吸收瘤胃非降解蛋白质 ARUP/(g/kg DM)	35.5[b]	57.6[a]	14.0[d]	26.1[c]	0.6
内源蛋白质 ECP/(g/kg DM)	11.7[a]	11.5[a]	3.3[b]	10.8[a]	0.5

可吸收内源真蛋白质 AECP/(g/kg DM)	4.5^{a}	4.2^{a}	1.3^{b}	5.1^{a}	0.3
可代谢蛋白质 MP/(g/kg DM)	96.8^{b}	106.7^{a}	59.1^{d}	66.7^{c}	0.8
瘤胃能氮平衡特点 Ruminal energy and nitrogen balance characteristics					
瘤胃可降解蛋白质提供的菌体蛋白质 MCP_{RDP}/(g/kg DM)	143.5^{a}	131.1^{b}	37.6^{c}	38.8^{c}	0.9
维持水平总可消化养分可提供的菌体蛋白质 MCP_{TDNm}/(g/kg DM)	88.9^{a}	69.8^{b}	64.7^{c}	56.4^{d}	0.4
瘤胃能氮供给量平衡 RENB/(g/kg DM)	-54.5	-61.2	27.2	16.5	1.1

2.4 NRC 模型估测 DCGF 和 3 种粗饲料可消化养分含量和能值

从表 4 可见，4 种饲料的可消化养分含量和能值存在较大差异。苜蓿的 tdNFC 含量最高（258.9 g/kg DM），DCGF 和玉米青贮 tdNFC 含量分别为 212.4 和 211.2 g/kg DM，显著高于羊草（P<0.05）。DCGF 和苜蓿的 tdCP 含量显著高于玉米青贮和羊草（P<0.05），而苜蓿的 tdNDF 含量显著低于其他 3 种饲料（P<0.05）。DCGF 的 TDNm 含量最高，苜蓿次之，并均显著高于玉米青贮和羊草（P<0.05）。4 种饲料的 DE_{P}、ME_{P}、NE_{LP}、NE_{m}、NE_{g} 以 DCGF 最高，苜蓿次之，而羊草的各能值最低。

表 4 NRC 模型估测 DCGF 和 3 种粗饲料可消化养分含量和能值

Table 4 Prediction of digestible nutrient contents and energy values of DCGF and other three kinds of roughages using NRC models

项目 Items	玉米纤维饲料 DCGF	苜蓿 Alfalfa hay	玉米青贮 Corn silage	羊草 Wildrye	SEM
真可消化养分 tdN/(g/kg DM)					
真可消化非纤维性碳水化合物 tdNFC	212.4^{b}	258.9^{a}	211.2^{b}	188.1^{c}	1.7
真可消化粗蛋白质 tdCP	199.3^{a}	204.0^{a}	49.6^{c}	71.7^{b}	1.9
真可消化中性洗涤纤维 tdNDF	301.4^{a}	137.7^{d}	273.3^{b}	242.2^{c}	2.2
真可消化脂肪酸 tdFA	42.4^{a}	6.7^{c}	36.2^{b}	4.0^{c}	1.8
估测总可消化养分 Predicted TDN/(g/kg DM)					
维持水平总可消化养分 TDNm	685.6^{a}	537.4^{b}	498.1^{c}	435.5^{d}	1.9
估测能值 Predicted energy values/(MJ/kg DM)					
生产水平消化能 DE_{P}	12.26^{a}	10.52^{b}	8.94^{c}	8.06^{d}	0.06

生产水平代谢能 ME_P	10.73^{a}	8.06^{b}	7.34^{c}	6.09^{d}	0.06
生产水平泌乳净能 NE_{LP}	6.65^{a}	4.89^{b}	4.37^{c}	3.58^{d}	0.09
维持净能 NE_m	6.90^{a}	4.82^{b}	3.85^{c}	3.03^{d}	0.14
增重净能 NE_g	4.32^{a}	2.73^{b}	1.59^{c}	0.79^{d}	0.07

3 讨 论

3.1 DCGF 和 3 种粗饲料营养成分

本试验较全面地比较分析了 DCGF 与奶牛常用粗饲料的营养成分差异，从常规营养成分可以看出，DCGF 含有较高的 NDF、CP、淀粉含量，具有作为奶牛良好的能量和蛋白质来源的潜力。Biricik 等[14]报道 DCGF 含有高含量的可利用 NDF，是可消化纤维的优质来源。DCGF 是玉米湿磨法生产淀粉所得的一种副产物，其细胞壁的木质化程度低于其他粗饲料，故 ADF 和 ADL 含量较低。3 种粗饲料 CP、NDF、ADF 等含量差异很大，各指标含量与 Coblentz 等[15]报道的结果相近。本试验中 DCGF 营养成分与潘春方等[16]报道的湿玉米纤维饲料（WCGF）相比，除 DM、ADF、SCP、ADICP 含量略高外，其他成分含量基本相近。本试验中 DCGF 样本淀粉含量达 106.3 g/kg DM，高于普通粗饲料，但是显著低于其原材料玉米（约 660 g/kg DM），且有关 DCGF 低淀粉、高果胶、高可发酵 CHO 对保证奶牛、肉牛瘤胃健康的报道已有很多，主要是因为在饲粮中添加一定比例的 DCGF 可以一定程度上避免淀粉在瘤胃中的快速发酵而引起的瘤胃酸中毒[17]。DCGF 和苜蓿含有较高比例的 CP，所以总 CHO 含量比玉米青贮和羊草低。DCGF 在生产过程中添加一定比例的玉米浓缩浆，故 CP 含量较高，且 SCP 和 NPN 含量较其他粗饲料显著提高[18]。根据 DCGF 的营养特点，其兼具蛋白质饲料和纤维饲料的双重优势，其供应不仅可以提高奶牛饲粮的营养水平，还可以在一定程度上缓解我国豆粕产品和优质粗饲料供应的紧张状况，有利于降低饲养成本，提高经济效益。

3.2 DCGF 和 3 种粗饲料蛋白质和 CHO 的 CNCPS 组分

CNCPS 评价饲料营养价值时将饲料的营养成分、植物细胞壁成分以及饲料在瘤胃中的降解特点有机的结合起来，使得饲料营养价值评价结果更具有参考价值，同时也反映出动物营养学新的发展方向。本试验中结果显示苜蓿的 PB2 组分含量显著高于其他 3 种饲料，其蛋白质含量比其他饲料具有较高的优势。DCGF 的 CP 含量较高，但其中 NPN 较多，PB 含

量低于苜蓿。DCGF 是由玉米皮和玉米浆混合干燥制成，未喷浆的玉米皮 CP 含量大约为 9.50% DM，而玉米浆 CP 中 SCP 和 NPN 较多，因此二者混合后生产的 DCGF 含有高比例的 PA，PB 含量较低[10]。同时，DCGF 还有极低的 PC 含量，其蛋白质的可利用性较高。玉米青贮也有较高的 PA 含量，PB 含量与 DCGF 相近，与周荣等[19]的研究结果相符。但在玉米青贮和 DCGF，PB2 和 PB3 含量存在差异，可能与 2 种饲料蛋白质分子结构不同有关。

利用 CNCPS 体系对 CHO 进行剖分，4 种饲料 CHO 各组分含量存在差异。本试验中 3 种粗饲料 CHO 组分均与靳玲品等[20]的结果基本一致。DCGF 的 CA 含量较低，CB1 和 CB2 含量较高，原因是 DCGF 含有较高含量的淀粉、果胶及半纤维素等可溶性多糖和可降解结构性 CHO[21]。苜蓿的 NSC 和 CA 含量极显著高于其他 3 种饲料，说明苜蓿 CHO 在瘤胃内降解速率较快；同时苜蓿因富含中性洗涤可溶性 CHO 而使 CB1 含量高于禾本科的羊草[22]。羊草的 CC 含量最高，说明其在瘤胃中降解速度较慢，利用率低，属于低质粗饲料；而 DCGF 的 CC 含量极低，可降解纤维 CB2 含量较高，可以作为一种优质的纤维饲料资源。

3.3　利用 CNCPS 对 DCGF 和 3 种粗饲料对奶牛潜在营养供应量的预测

4 种试验饲料的 CNCPS 潜在营养供给量存在较显著差异。DCGF 和玉米青贮 CP 中 RDP 含量比苜蓿和羊草高，其原因在于 DCGF 和玉米青贮的 NPN 含量较高，在瘤胃中迅速被微生物降解利用，而剩余的少部分 RUP 进入真胃和小肠被分解利用。NRC（2001）[12]建议 RUP 占奶牛饲粮的比例应达到 33%~40%，故 DCGF 和玉米青贮 RDP 和 RUP 供给不平衡。在 CNCPS 预测模型中，MCP 产量与饲料的 TDNm 含量呈正相关关系，本试验结果表明 DCGF 的 TDNm 含量最高，3 种粗饲料 TDNm 含量由高到低依次为苜蓿、青贮玉米、羊草，故 DCGF 的 MCP 含量估测值最高，而羊草最低。依据 CNCPS，MCP 中 80%为 PB，其在小肠内的吸收率约为 80%；而 RUP 在小肠中吸收率约为 85%。瘤胃 ECP（含 80%PB）的产量与饲料 DM 含量正相关，且有 50%的 ECP 可到达十二指肠被吸收利用，故玉米青贮 ECP 和 AECP 显著低于其他 3 种饲料。MP 为小肠可吸收蛋白质的总和，以苜蓿的 MP 含量最高，其次为 DCGF，说明苜蓿蛋白质的营养价值优于 DCGF，且 DCGF 优于玉米青贮和羊草。

饲粮的能氮平衡 RENB 评价是通过计算饲粮的 MCP_{TDNm} 和 MCP_{RDP} 之差来体现的，因此利用 CNCPS 评价单一饲料 RENB 时则以该饲料作为单一饲粮来估测[7]。根据张丽君等[23]的理论，如果 MCP_{TDNm} 与 MCP_{RDP} 差值为 0，说明能氮平衡良好；如果差值为负值，则说明

能量供给不足；反之，RDP 供给不足。本试验中 DCGF 和苜蓿的 RENB 为负值，说明 2 种饲料能量供给不足，而玉米青贮和羊草 RDP 供给不足。以上营养供给值均属于模型预测值，能否在动物代谢试验中的得到相同的验证结果还有待于进一步的研究。

3.4 DCGF 和 3 种粗饲料可消化养分含量和能值

美国 NRC 模型根据纤维分析方法将饲料中 CHO 划分为两部分，即非纤维性碳水化合物（NFC）和纤维性碳水化合物（FC）[12]。DCGF 和苜蓿都含有较高含量的 tdNFC 和 tdCP，这与其 NFC 和 CP 含量较高有关，且 tdNFC 含量与饲料的加工调制有关，即计算 tdNFC 时需考虑 PAF[24]。而饲料 CP 对能量供应所做的贡献也依赖于 ADICP 占 CP 比例的多少，根据 NRC（2001）[12]，tdCP 与 ADICP 占 CP 比例成指数关系。4 种饲料中苜蓿 NDF 含量最低，DCGF 的 NDICP、ADL 含量最低，故 DCGF 的 tdNDF 含量最高，而苜蓿 tdNDF 含量最低，即 4 种饲料中 DCGF 的 NDF 对能量供应的贡献值最大。Biricik 等[14]和 Kelzer 等[21]也报道 DCGF 的瘤胃 tdNDF 含量高，可发酵的纤维性碳水化合物比例较高。根据 NRC 模型，饲料 TDNm 含量为各种真可消化养分之和减去粪中可代谢 TDNm（7% DM）[24]，因而 4 种饲料中 TDNm 含量由高到低依次为 DCGF、苜蓿、玉米青贮和羊草，因而各能值也有相同的趋势。表明在提供能量方面，DCGF 具有最大的优势，其次为苜蓿，而羊草所能提供的能量较少。但是，试验原料的可消化养分及各能值是基于前人的预测模型所得，非体内代谢试验实测值。模型的使用中假定饲料特性限制了能量的利用。饲料的成分和 DM 采食量对消化率及其能值具有显著影响，对于不能维持瘤胃最佳发酵状态的饲料，其能值的估计值可能偏高。

4 结 论

① DCGF 具有高水平的可利用 CP、可利用 NDF，与其他 3 种粗饲料相比，DCGF 可以为反刍动物提供更多的 MCP、MP、ME，但是可均为模型推算结果，还需要在动物试验中进一步验证。

② 根据 4 种饲料可提供的营养物质结果可知，DCGF 具有较高的营养价值，可以为奶牛提供较高水平的可代谢能量和蛋白质，可以作为纤维类蛋白质饲料替代奶牛饲粮中部分粗饲料，如苜蓿，缓解我国优质粗饲料资源紧缺的压力。

参考文献：

[1] LOE E R,BAUER M L,LARDY G P.Grain source and processing in diets containing varying concentrations of wet corn gluten feed for finishing cattle[J].Journal of Animal Science,2006,84(4):986–996.

[2] FIRKINS J L,EASTRIDGE M L,PALMQUIST D L.Replacement of corn silage with dry corn gluten feed and sodium bicarbonate for lactating dairy cows[J].Journal of Dairy Science,1991,74(6):1944–1952.

[3] NUEZ-ORTÍN W G,YU P Q.Estimation of ruminal and intestinal digestion profiles,hourly effective degradation ratio and potential N to energy synchronization of co-products from bioethanol processing[J].Journal of the Science of Food and Agriculture,2010,90(12):2058–2067.

[4] AOAC.Official methods of analysis[S].16th ed.Arlington,V.A.:Association of Official Analytical Chemists,1995.

[5] 张旭,蒋桂韬,王向荣,等.酶法测定谷物副产品中淀粉含量[J].广东饲料,2013,22(10):33–35.

[6] VAN SOEST P J,ROBERTSON J B,LEWIS B A.Methods for dietary fiber,neutral detergent fiber,and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition[J].Journal of Dairy Science,1991,74(10):3583–3597.

[7] SNIFFEN C J,O'CONNOR J D,VAN SOEST P J,et al.A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: Ⅱ.carbohydrate and protein availability[J].Journal of Animal Science,1992,70(11):3562–3577.

[8] CHALUPA W,SNIFFEN C J.Carbohydrate,protein and amino acid nutrition of lactating dairy cattle[M]//GARNSWORTHY P L,COLE D J A.Recent Advances in Animal Nutrition.Nottingham:Nottingham University Press,1994.

[9] 杜晋平,任丽萍,赵金石,等.利用 CNCPS 研究玉米和豆粕中碳水化合物不同组分的瘤胃降解和小肠消化[J].畜牧与饲料科学,2008,29(6):126–129.

[10] 林曦.甜菜渣青贮营养价值的评定及其在奶牛生产中应用的研究[D].硕士学位论文.哈尔滨:东北农业大学,2010.

[11] FOX D G,TYLUTKI T P,TEDESCHI L O,et al.The net carbohydrate and protein system for evaluating herd nutrition and nutrient excretion[Z].Ithaca:Cornell University,2000.

[12] NRC.Nutrient requirements of dairy cattle[S].7th ed.Washington,D.C.:National Academy Press,2001.

[13] NRC.Nutrient requirements of beef cattle[S].7th ed.Washington,D.C.:National Academy Press,1996.

[14] BIRICIK H,GENCOGLU H,BOZAN B,et al.The effect of dry corn gluten feed on chewing activities and rumen parameters in lactating dairy cows[J].Italian Journal of Animal Science,2007,6(1):61–70.

[15] COBLENTZ W K,ABDELGADIR I E O,COCHRAN R C,et al.Degradability of forage proteins by *in situ* and *in vitro* enzymatic methods[J].Journal of Dairy Science,1999,82(2):343–354.

[16] 潘春方.湿玉米纤维饲料在奶牛生产中的应用及其保存技术的研究[D].博士学位论文.哈尔滨:东北农业大学,2014.

[17] SARWAR M,FIRKINS J L,EASTRIDGE M L.Effect of replacing neutral detergent fiber of forage with soy hulls and corn gluten feed for dairy heifers[J].Journal of Dairy Science,1991,74(3):1006–1017.

[18] 林谦,戴求仲,蒋桂韬,等.玉米及其加工副产品的营养价值评定[J].中国饲料,2013(4):18–21.

[19] 周荣,王加启,潘发明,等.饲料蛋白组分对反刍家畜常用饲料小肠吸收蛋白质含量的影响[J].华北农学报,2010,25(增刊):165–169.

[20] 靳玲品,李艳玲,屠焰,等.应用康奈尔净碳水化合物-蛋白质体系评定我国北方奶牛常用粗饲料的营养价值[J].动物营养学报,2013,25(3):512–526.

[21] KELZER J M,KONONOFF P J,TEDESCHI L O,et al.Evaluation of protein fractionation and ruminal and intestinal digestibility of corn milling co-products[J].Journal of Dairy Science,2010,93(6):2803–2815.

[22] NIE Z,HAN J,LIU T,et al.*Hot topic*:application of support vector machine method in

prediction of alfalfa protein fractions by near infrared reflectance spectroscopy[J].Journal of Dairy Science,2008,91(6):2361–2369.

[23] 张丽君,金双勇.试用瘤胃能氮平衡原理评价奶牛日粮[J].中国乳业,2005(11):33–34.

[24] (美)国家科学研究委员会.奶牛营养需要[M].孟庆翔，译.北京:中国农业大学出版社,2002.

Comparison of Nutrition Values of Dry Corn Gluten Feed and Commonly Used Roughages using Cornell Net Carbohydrate and Protein System and National Research Council Models[2]

HAO Xiaoyan GAO Hong ZHANG Xingyi WANG Xiaofan DING Xue ZHANG Yonggen*

（*College of Animal Science and Technology*， *Northeast Agricultural University*， *Harbin* 150030， *China*）

Abstract: The aim of this study was to compare the nutrition values of dry corn gluten feed (DCGF) and commonly used roughages for dairy cattle (alfalfa hay, corn silage and wildrye) using Cornell net carbohydrate and protein system (CNCPS) and National Research Council (NRC) models, and to analyze the feasibility of DCGF as fiber source for dairy cattle. Feed samples were collected from different farms and then nutrient composition was determined. The protein and carbohydrate fractions were partitioned using CNCPS. At the same time, NRC models were used to predict the digestible nutrient contents and energy values of four kinds of feedstuffs. The results showed as follows: 1) the content of crude protein (CP) of DCGF was significantly higher than those of corn silage and wildrye ($P<0.05$), and the content of neutral detergent fiber (NDF) was significantly higher than that of alfalfa hay ($P<0.05$), however, the contents of acid detergent fiber (ADF) and acid detergent lignin (ADL) of DCGF were significantly lower than those of other three kinds of roughages ($P<0.05$). 2) The contents of rapidly degraded true protein (PB1) and intermediately degraded true protein (PB2) factions of DCGF were significantly lower than those of alfalfa hay ($P<0.05$), and the contents of intermediately degraded carbohydrate (CB1) and

*Corresponding author, professor, E-mail: zhangyonggen@sina.com

（责任编辑 王智航）

slowly degraded carbohydrate (CB2) of DCGF were significantly higher than those of other roughages (*P*<0.05). 3) The content of metabolizable protein (MP) of alfalfa hay was the highest, and DCGF was at second. 4) Compared with other three kinds of roughages, the truly digestible nutrients at maintenance level and energy values for DCGF were the highest. The results indicate that DCGF has relatively high nutrition values and can be used in dairy cattle diet as fiber feed instead of parts of roughages to relieve the pressure of high quality roughage and protein feeds shortage.

Key words: dry corn gluten feed; roughage; nutrition value; energy value